

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ШАХТНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО РАЗРЕЖЕНИЮ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ

Жежера Н. И., Тюков Н.И.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

На рисунке 1 изображена принципиальная схема шахтной печи для обжига известняка [1], используемая на сахарных заводах для получения извести и углекислого газа. Шахтная печь для обжига известняка состоит из шахты 1 цилиндрической формы с загрузочным устройством 2 в верхней его части и выгрузочным устройством 3 в нижней части.

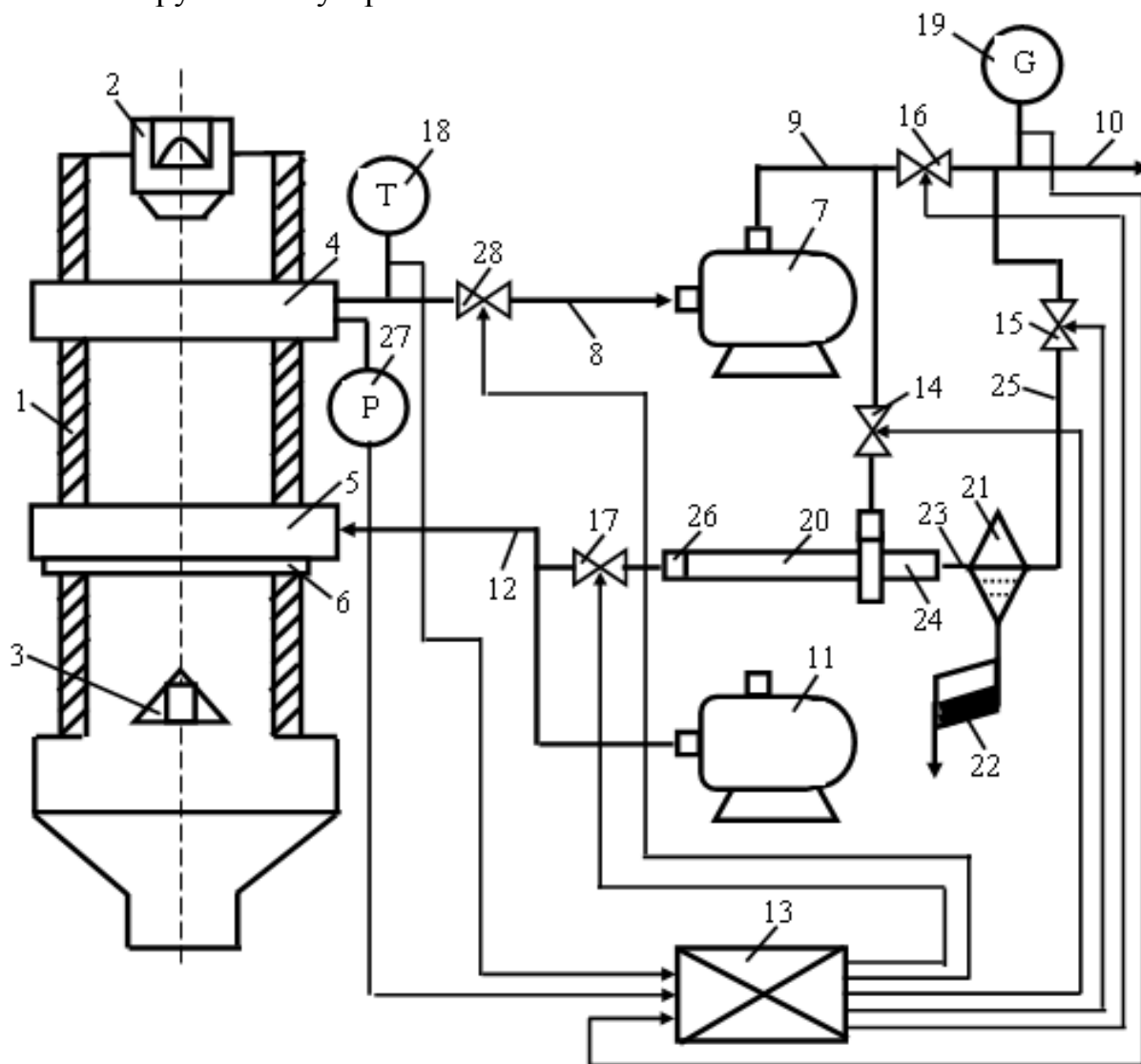


Рисунок 1 – Принципиальная схема шахтной печи для обжига известняка

В горизонтальных сечениях шахты 1 печи размещены короб отсоса печных газов 4 и короб для подачи воздуха в печь, установленный на фланце 6. Газовый насос 7 своим входным патрубком и трубопроводом 8 соединен с коробом отсоса печных газов 4. Нагнетательный патрубок насоса 7

трубопроводом 9 подключен к коллектору печных газов 10. Нагнетательный патрубок вентилятора 11 трубопроводом 12 соединен с коробом 5, а всасывающий патрубок - с калорифером (не показано).

К блоку управления 13 подключены управляемые клапаны 14, 15, 16, 17, 28, а также датчики температуры 18, расхода 19 и разрежения 27. Вихревая труба 20 соединена через клапан 14 с трубопроводом 9, ее «холодный» конец 24 через клапан 15 подключен к коллектору печных газов 10, а «горячий» конец 26 через управляемый клапан 17 - к трубопроводу 12. Датчик 27 разрежения расположен на коробе 4 отсоса печных газов, регулирующий орган 28 расположен на трубопроводе 8, соединенным с одной стороны с коробом отсоса печных газов 4, а с другой - с всасывающим патрубком 8 газового насоса 7 отсоса печных газов.

Шахтная печь для обжига известняка работает по следующему технологическому процессу. Определенное по технологическим регламентам количество известняка и твердого топлива через загрузочное устройство 2 подают с помощью скипового подъемника в шахту 1 печи. Подогретый в калорифере воздух на горение поступает в шахтную печь от вентилятора 11 через короб 5. Из короба 4 отсоса печных газов через регулирующий орган 28 и трубопровод 8 печные газы с температурой, воспринимаемой датчиком 18, отводятся газовым насосом 7 через клапан 16 к коллектору печных газов 10.

Датчик 27 разрежения, подключенный к коробу 4 отсоса печных газов, измеряет в коробе 4 и верхней части печи разрежение и передает сигнал в блок управления 13. По сигналам от блока управления 13 регулирующий орган 28, установленный на трубопроводе 8, изменяет разрежение в коробе 4 отсоса печных газов и в верхней части шахтной печи 1 для обжига известняка.

На рисунке 2 приведена схема модели шахтной печи для обжига известняка как объекта автоматического управления по разрежению печных газов. Она содержит пневматическое сопротивление 3, эквивалентное сопротивлениям 4, расположенное на входе воздуха в шахтную печь, емкости 5 (зон подготовки и обжига известняка в шахтной печи) и регулирующего клапана 6 (клапан 28 на рисунке 1), расположенного на выходе печных газов из шахтной печи по разрежению. Сопротивления 4 моделируют форсунки, пропускающие воздух в печь через короб 5 (рисунок 1).

Для емкости, пневматического сопротивления, расположенного перед емкостью, и регулирующего клапана (рисунок 2) динамический процесс представим в виде

$$V_2 \frac{d\rho}{dt} = G_1 - G_2, \quad (1)$$

где V_2 - объем печных газов в емкости 5, кг/м^3 ; G_1 и G_2 - массовый расход печных газов в емкость 5 и из этой емкости, кг/с ; t - время, с.

Для газовых сред известно [2] уравнение $P/\rho = RT$. После дифференцирования этого выражения по плотности среды и давлению, оно

принимает вид $dP_2 = RTd\rho$ или $dP_2/dt = RTd\rho/dt$. Подставив это выражение в уравнение (1), получим

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = G_1 - G_2. \quad (2)$$

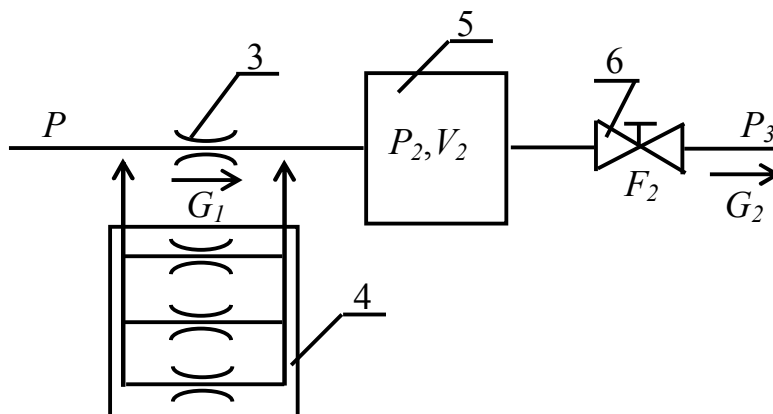


Рисунок 2 - Схема модели шахтной печи для обжига известняка как объекта автоматического управления по разрежению печных газов

Принимаем докритической скоростью печных газов из шахтной печи через клапан 6 (рисунок 2). Для докритического движения газов через регулирующий клапан массовый расход G_2 определяется по выражению [3]

$$G_2 = \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2 (P_2 - P_3)}{RT}}, \quad (3)$$

где μ_2 – коэффициент расхода печных газов для клапана; F_2 - площадь сечения клапана, через которое проходят печные газы, m^2 ; K_a – коэффициент, вычисляемый по формуле из работы [2] по коэффициенту адиабаты; P_2, P_3 - давление печных газов в емкости 5 и после регулирующего клапана 6, Па.

Расход печных газов через сопротивление 4 определим по формуле для расхода газов через щели [4]

$$Q_\phi = \phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho_2} (P - P_2)},$$

где Q_ϕ - расход печных газов через сопротивление 4, m^3/c ; d_ϕ – внутренний диаметр сопротивления, м; P и P_2 - давление печных газов, Па; ρ_2 - плотность печных газов, kg/m^3 ; ϕ - коэффициент расхода печных газов для пневматического сопротивления.

Учитывая, что массовый расход воздуха G_ϕ , kg/c , и объемный расход Q_ϕ , m^3/c , взаимосвязаны выражением $G_\phi = Q_\phi \cdot \rho_2$, тогда

$$G_\phi = \phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{2\rho_2 \cdot (P - P_2)}.$$

Так как воздух проходит через n параллельно соединенных дросселей 4 (форсунок), тогда массовый расход воздуха в шахтную печь G_1 , m^3/c

$$G_1 = n \cdot \varphi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)}$$

или

$$G_1 = \varphi \cdot F_2 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)}, \quad (4)$$

где $F_2 = n \cdot \pi d_\phi^2 / 4$ - площадь проходных сечений параллельно расположенных дросселей (форсунок), через которые проходит воздух в шахтную печь.

Подставив соотношения (3) и (4) в уравнение (2), получим

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = \varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)} - \mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}}. \quad (5)$$

Так как уравнение (5) нелинейное, его обычно линеаризуют. Принимаем переменными величинами в уравнении (5) F_1, F_2, P, P_2 и P_3 , для которых установившиеся значения принимают вид:

$$F_1 \rightarrow F_{10}; F_2 \rightarrow F_{20}; P_2 \rightarrow P_{20}; P \rightarrow P_0; P_3 \rightarrow P_{30}. \quad (6)$$

Если переменные величины выразить через постоянные начальные значения и приращения, тогда:

$$F_1 = F_{10} + \Delta F_1; F_2 = F_{20} + \Delta F_2; P = P_0 + \Delta P; P_2 = P_{20} + \Delta P_2; P_3 = P_{30} + \Delta P_3. \quad (7)$$

Разложим в ряд Тейлора правую часть выражение (5) по переменным первого порядка F_1, F_2, P, P_2 и P_3 , считая его функцией $M(F_1, F_2, P, P_2, P_3 \dots)$.

$$\begin{aligned} M(F_1, F_2, P, P_2, P_3) &= M(F_{10}, F_{20}, P_0, P_{20}, P_{30}) + \left(\frac{\partial M}{\partial F_1} \right)_0 \Delta F_1 + \\ &+ \left(\frac{\partial M}{\partial F_2} \right)_0 \Delta F_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left(\frac{\partial M}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 + \left(\frac{\partial M}{\partial P_3} \right)_0 \Delta P_3. \end{aligned} \quad (8)$$

Согласно соотношению (8) формула (5) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} &= \left(\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)} \right)_0 + \left(\frac{\partial [\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)}]}{\partial F_1} \right)_0 \Delta F_1 + \\ &+ \left(\frac{\partial [\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)}]}{\partial P} \right)_0 \Delta P + \left(\frac{\partial [\varphi \cdot F_1 \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P - P_2)}]}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 - \\ &- \left(\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right)_0 - \left(\frac{\partial \left[\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial F_2} \right)_0 \Delta F_2 - \\ &- \left(\frac{\partial \left[\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P_2} \right)_0 \Delta P_2 - \left(\frac{\partial \left[\mu_2 F_2 K_a \sqrt{\frac{P_2(P_2 - P_3)}{RT}} \right]}{\partial P_3} \right)_0 \Delta P_3. \end{aligned} \quad (9)$$

В выражении (9) сначала определяются производные, а потом производится подстановка установившихся значений из выражений (6) вместо переменных параметров

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{RT} \frac{dP_2}{dt} = & \varphi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} + \varphi \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta F_1 + \\ & + \varphi \cdot F_{10} \cdot \frac{\rho_z}{\sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})}} \Delta P + \varphi \cdot F_{10} \cdot \frac{-\rho_z}{\sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})}} \Delta P_2 - \\ & - \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} - \mu_2 K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} \Delta F_2 - \\ & - \mu_2 F_{20} K_a \frac{(2P_{20} - P_{30})}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}} \Delta P_2 + \mu_2 F_{20} K_a \frac{P_{20}}{2RT \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Рассматривая установившееся движение печных газов из шахтной печи, выражение (5) при значениях соотношений (6) принимает вид

$$\frac{V_2}{RT} \frac{dP_{20}}{dt} = \varphi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} - \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}} = 0. \quad (11)$$

Производная от постоянной величины dP_{20}/dt равна нулю, а поэтому и выражение (11) равно нулю. Это уравнение характеризует установившийся расход печных газов через составляющие элементы схемы, которая приведена на рисунке 2, а именно

$$G_0 = \varphi \cdot F_{10} \cdot \sqrt{2\rho_z \cdot (P_0 - P_{20})} = \mu_2 F_{20} K_a \sqrt{\frac{P_{20}(P_{20} - P_{30})}{RT}}. \quad (12)$$

Если из уравнения (10) вычесть уравнение (11), а затем разделить обе части выражения на установившееся значение расхода G_0 , тогда получим

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P_2 - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \\ & - \frac{(2P_{20} - P_{30})}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (13)$$

После упрощения выражение (13) принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} = & \frac{\Delta F_1}{F_{10}} + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} - \\ & - \frac{1}{2} \left[\frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \right] \Delta P_2 + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3 \\ \text{или} \quad \frac{V_2}{G_0 RT} \frac{dP_2}{dt} + & \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_2 = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \\ & + \frac{1}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \Delta P + \frac{P_{20}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \Delta P_3. \end{aligned} \quad (14)$$

Запишем уравнение (14) так, чтобы в нём были отношения $\Delta P/P_0$; $\Delta P_2/P_{20}$ и $\Delta P_3/P_{30}$.

$$\frac{V_2 \cdot P_{20}}{G_0 RT} \frac{d\left(\frac{\Delta P_2}{P_{20}}\right)}{dt} + \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_2}{P_{20}} = \frac{\Delta F_1}{F_{10}} - \frac{\Delta F_2}{F_{20}} + \frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} \frac{\Delta P_3}{P_{30}}. \quad (15)$$

Вводим обозначения: $\frac{V_2 P_{20}}{G_0 RT} = T_b$; $\frac{\Delta P}{P_0} = x(t)$; $\frac{\Delta F_1}{F_{10}} = b(t)$; $\frac{\Delta P_2}{P_{20}} = y(t)$;

$$\frac{\Delta F_2}{F_{20}} = m(t); \quad \frac{\Delta P_3}{P_{30}} = n(t); \quad \frac{P_{20}(P_0 - P_{20}) + P_{30}P_0}{2(P_0 - P_{20})(P_{20} - P_{30})} = \kappa_1;$$

$$\frac{P_0}{2 \cdot (P_0 - P_{20})} = \kappa_2; \quad \frac{P_{20}P_{30}}{2P_{20}(P_{20} - P_{30})} = \kappa_3. \quad (16)$$

Уравнение (15) после подстановки соотношений (16) принимает вид

$$T_b \frac{dy}{dt} + \kappa_4 y(t) = b(t) - m(t) + \kappa_5 x(t) + \kappa_6 n(t). \quad (17)$$

Если дифференциальное уравнение (17) преобразовать по Лапласу, тогда

$$(T_b s + \kappa_1) y(s) = b(s) - m(s) + \kappa_2 x(s) + \kappa_3 n(s), \quad (18)$$

где s-оператор Лапласа.

Структурная схема модели шахтной печи как объекта автоматического управления по разрежению печных газов, состоящая из обобщенного пневматического сопротивления, расположенного на входе воздуха в шахтную печь, и регулирующего клапана, расположенного на выходе печных газов из шахтной печи, построена по выражению (18) и приведена на рисунке 3.

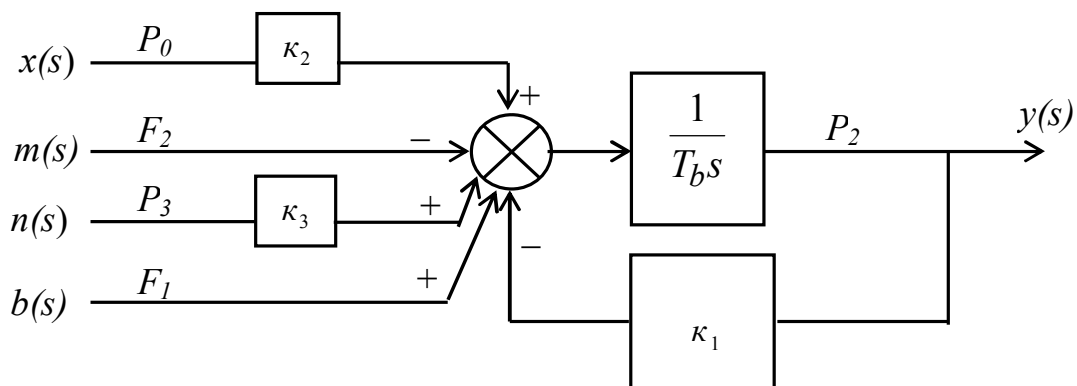


Рисунок 3 - Структурная схема модели шахтной печи как объекта автоматического управления по разрежению печных газов

По каждому входному параметру относительно выходной величины объекта автоматического управления по структурной схеме (рисунок 3) можно определить передаточную функцию. Например, для разрежения P_2 в шахтной печи относительно площади проходного сечения регулирующего клапана, который изменяет отвод печных газов из шахтной печи в атмосферу, передаточная функция имеет вид $W_{p_2/F_1}(s) = y(s)/m(s) = 1/(T_b s + \kappa_1)$.

Таким образом, разработано математическое описание шахтной печи для обжига известняка как объекта автоматического управления по

разрежению печных газов. Составленное дифференциальное уравнение устанавливает взаимосвязь между разрежением печных газов в шахтной печи для обжига известняка и массовым расходом и давлением воздуха, поступающего в шахтную печь на горение, расходом и давлением печных газов, выходящих через регулирующий орган из шахтной печи. Дифференциальное уравнение преобразовано к операторному виду и определены типовые динамические звенья. На основе выделенных типовых динамических звеньев составлена структурная схема шахтной печи для обжига известняка как объекта автоматического управления по разрежению печных газов.

Список литературы

- 1. Патент РФ № 2431096, кл. F27B1/00. Шахтная печь для обжига сыпучего материала. Авторы изобретения: Емельянов С. Г., Кобелев Н. С., Алябьева Т. В., Овчаренко О. А, Журавлёв А. Ю., Дюмин А. С. Приоритет от 23.11. 2009. Оpubл. 10.10.2011. Бюл. №11.*
- 2. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика: учебник для вузов / Б.Т. Емцев; М-во высш. и средн. образования СССР. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987.- 440 с.*
- 3. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Иващенко; Мин-во высш. и средн. специал. образования СССР. – Изд. 4-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. - 736 с.*
- 4. Нагорный, В.С. Устройства автоматики гидро- и пневмосистем / В.С. Нагорный, А.А. Денисов. – М. : Высшая школа, 1991.–367 с.*